

Experimenteller Beitrag zum Reibungseinfluß auf die Strömung durch ebene Schaufelgitter

Gersten, Klaus

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 7, 1955, S. 93-99



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Experimenteller Beitrag zum Reibungseinfluß auf die Strömung durch ebene Schaufelgitter

Von Klaus Gersten

Mit 4 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn H. Schlichting

Summary: In order to clarify the influence of viscosity in cascade problems, two very simple cascade arrangements have been investigated experimentally: 1) a flat plate cascade with an angle of stagger of 45° and inflow direction parallel to the plates, 2) a cascade consisting of circular cylinders with angle of inflow of 45° . The pressure drop across the cascade and the angle of deflection have been measured for different solidity ratios, both being due purely to viscosity effects. For the flat plate cascade the deflection is towards the trailing edge plane, but for the circular cylinder cascade in the opposite direction. For the flat plate cascade there is good agreement of experimental and theoretical results as obtained from boundary layer theory [2]. For the circular cylinder cascade the deflection is caused by asymmetrical separation of the flow, but there is no theory available.

1. Einleitung

Das ebene Schaufelgitter hat die Aufgabe, eine Umlenkung der Strömung und eine Druckumsetzung beim Durchströmen des Gitters hervorzurufen. Die Wirkungsweise eines solchen Gitters läßt sich — jedenfalls bei schlanken Schaufelprofilen — in erster Annäherung durch eine potentialtheoretische Behandlung der Strömung erklären (vgl. H. Schlichting [1]). Eine gute Übereinstimmung mit den wirklichen Vorgängen im Gitter ist jedoch nur bei Mitberücksichtigung der Reibung in der Strömung zu erwarten. Von H. Schlichting und N. Scholz [2] wurden daher erstmalig die Methoden der Grenzschichttheorie auf die Gitterströmung angewendet und mittels einer Impulsbetrachtung aus den Grenzschichtgrößen an den Gitterschaufeln auch die Strömungswerte sehr weit hinter dem Gitter berechnet.

Im folgenden werden zwei besonders einfache Gitteranordnungen untersucht, und zwar ein gestaffeltes Plattengitter bei stoßfreiem Eintritt und ein Zylindergitter (vgl. Abb. 1). Diese beiden Anordnungen zeichnen sich dadurch aus, daß die reibungslose Flüssigkeit die Gitter ohne Umlenkung und Druckumsetzung durchströmt*). Die experimentell beobachteten Effekte sind daher reine Reibungseinflüsse. Die vorliegende Untersuchung hat nun das Ziel, die verschiedenen Reibungseinflüsse aus dem Experiment zu entnehmen und, soweit möglich, mit theoretischen Aussagen zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, daß die Reibung in beiden Fällen eine Umlenkung der Strömung verursacht, jedoch für die beiden untersuchten Gitter in verschiedener Richtung. Während beim Plattengitter die Strömung zur Gitterfront hin abgelenkt wird, erfolgt die Umlenkung beim Zylindergitter entgegengesetzt, d. h. auf die Gitternormale zu.

*) Dabei ist in beiden Fällen die zirkulationsfreie Potentialströmung angenommen.

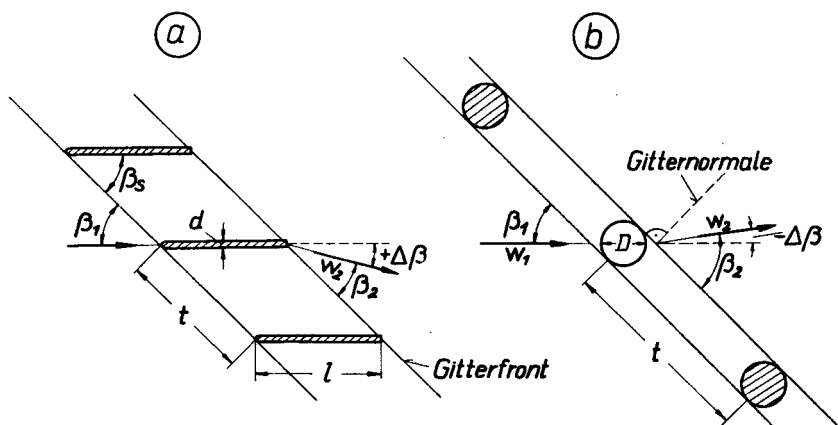


Abb. 1: Übersicht der beiden untersuchten Gitteranordnungen; Zuströmwinkel $\beta_1 = 45^\circ$; Umlenkung $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$, a) Plattengitter, Stafflungswinkel $\beta_s = 45^\circ$, Teilungsverhältnis t/l und Dickenverhältnis d/l siehe Tabelle 1. b) Zylindergitter, Teilungsverhältnis $t/D = 4,2$.

2. Messungen am Plattengitter

Die beiden untersuchten Gitteranordnungen sind in Abb. 1 dargestellt*). Das Plattengitter wurde bei einem festen Stafflungswinkel $\beta_s = 45^\circ$ und fester Anströmrichtung $\beta_1 = 45^\circ$, d. h. bei stoßfreiem Eintritt der Strömung, für verschiedene Teilungsverhältnisse t/l und relative Plattendicken d/l gemessen. In Tabelle 1 sind die gewählten Anordnungen zusammengestellt. Es wurden 3 bis 11 Platten verwendet.

Tabelle 1. Zusammenstellung der am Plattengitter gemessenen Anordnungen.
 t/l = Teilungsverhältnis, d/l = Dickenverhältnis, \times = gemessene Anordnung.

$d/l \backslash t/l$	0,18	0,25	0,35	0,50
0,008		\times		\times
0,032	\times	\times	\times	\times
0,064			\times	\times

Die Zuströmgeschwindigkeit betrug $w_1 = 30 \text{ m/s}$ und die Plattenlänge $l = 250 \text{ mm}$. Daraus ergab sich eine Reynoldszahl von $Re = w_1 l / \nu = 5 \cdot 10^5$. Die Platten waren an der Nase halbkreisförmig abgerundet, an der Hinterkante dagegen scharfkantig senkrecht abgeschnitten. Zur Ermittlung der Strömungsgrößen am Gitter wurden im Nachlauf der Platten Impulsmessungen durchgeführt und die so gefundenen Werte nach einem von N. Scholz [3, 4] angegebenen Verfahren auf die ausgeglichene Strömung sehr weit hinter dem Gitter umgerechnet. Die Meßergebnisse sind in den Abbildungen 2 und 3 wiedergegeben. Abb. 2 zeigt die Umlenkungen, die mit wachsendem Teilungsverhältnis t/l abnehmen und mit wachsender relativer Dicke d/l zunehmen. Die Druckverluste in Abb. 3 zeigen dieselbe Abhängigkeit.

*) Die vorliegenden Messungen wurden 1953 von Herrn cand. mach. H. Mylius im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Strömungsmechanik der T. H. Braunschweig unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H. Schlichting durchgeführt.

Abb. 2

Umlenkung $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ der
Strömung beim Plattengitter

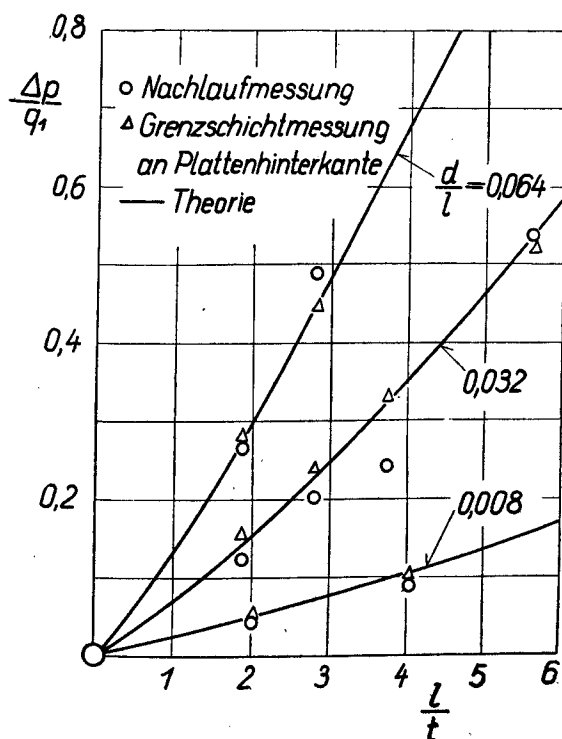
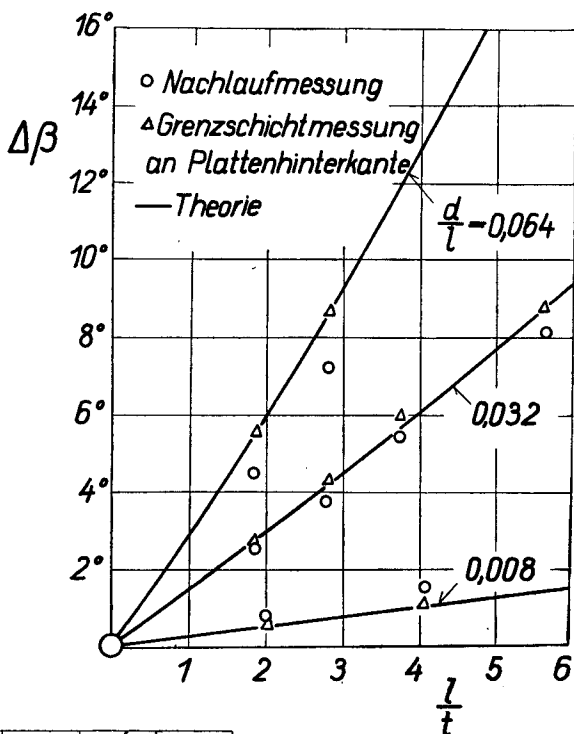


Abb. 3

Druckabfall $\Delta p/q_1 = (p_1 - p_2)/q_1$
der Strömung beim Plattengitter

3. Vergleich mit der Theorie

Die Umlenkung und der Druckabfall im Plattengitter beruhen hauptsächlich auf den Vorgängen, die sich an der Plattenhinterkante abspielen. Infolge der endlichen Dicke der Hinterkante und der von der Plattengrenzschicht herrührenden Verengung des Strömungsquerschnitts zwischen den Platten tritt an der Hinterkante der Platte plötzlich eine starke Erweiterung des Strömungsquerschnitts ein. Die dabei auftretenden Energieverluste führen zu dem als *Carnotschen Stoßverlust* bezeichneten Druckverlust

$$\Delta p/q_1 = (p_1 - p_2)/q_1 \quad \text{mit} \quad q_1 = \frac{\rho}{2} w_1^2$$

als Staudruck der Zuströmung. Ferner sinkt infolge der Querschnittserweiterung die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Gitter ab, während die Komponente in Gitterrichtung unverändert bleibt, so daß im ganzen eine Umlenkung der Strömung zur Gitterfront hin erfolgt (vgl. [5], S. 30).

Die theoretische Berechnung der Umlenkung und des Druckverlustes erfolgt in zwei Schritten: Im ersten Schritt wird die an der Platte sich bildende Grenzschichtströmung berechnet. Aus den so gewonnenen Grenzschichtwerten an der Plattenhinterkante, nämlich Verdrängungsdicke δ_H^* und Impulsverlustdicke ϑ_H (vgl. [6], S. 105), wird im zweiten Schritt mittels einer Impulsbetrachtung die Strömung sehr weit hinter dem Gitter ermittelt.

Für die Grenzschichtrechnung wurde angenommen, daß die Strömung zwischen den Platten homogen ist, d. h. konstante potentialtheoretische Geschwindigkeit w_H besitzt, die infolge der Verdrängungswirkung der endlichen Plattendicke etwas größer ist als w_1 nämlich

$$w_H = \frac{w_1}{1 - \frac{d}{t \cdot \sin \beta_S}} \quad (1)$$

Unter der Annahme, daß die Grenzschicht von der Plattenvorderkante an turbulent ist und die Geschwindigkeitsverteilung in der Grenzschicht dem $1/7$ -Potenzgesetz genügt, erhält man für die Verdrängungsdicke der Grenzschicht an der Plattenhinterkante

$$\frac{\delta_H^*}{l} = \frac{0,046}{\sqrt[5]{Re_H}} \quad (2)$$

und für die Impulsverlustdicke

$$\frac{\vartheta_H}{l} = \frac{0,036}{\sqrt[5]{Re_H}}, \quad (3)$$

wobei die *Reynoldszahl*

$$Re_H = \frac{w_H \cdot l}{\nu} \quad (4)$$

mit der aus (1) ermittelten Geschwindigkeit w_H gebildet ist (vgl. [6], S. 393). Aus diesen Werten lassen sich nun nach *H. Schlichting* und *N. Scholz* [2] unter Benutzung des Impulssatzes die Strömungsgrößen sehr weit hinter dem Gitter

bestimmen. Diese Impulsbetrachtung zeigt, daß die Reibung stets einen Druckabfall und eine Umlenkung zur Gitterfront hin zur Folge hat. Im vorliegenden Fall erhält man mit den Abkürzungen

$$\Delta^* = \frac{2\delta_H^* + d}{t \cdot \sin \beta_1} \quad (5)$$

und

$$\Theta = \frac{2 \vartheta_H}{t \cdot \sin \beta_1} \quad (6)$$

für den Abströmwinkel β_2 :

$$\operatorname{ctg} \beta_2 = \operatorname{ctg} \beta_1 \frac{1 - \Theta - \Delta^*}{(1 - \Delta^*)^2} \quad (7)$$

und den Druckabfall $\Delta p = p_1 - p_2$:

$$\frac{\Delta p}{q_1} = \frac{\Theta + \Delta^*}{(1 - \Delta^*)^2} \quad (8)$$

Die auf diesem Wege berechneten Werte $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ und $\Delta p/q_1$ sind in den Abbildungen 2 und 3 als ausgezogene Kurven eingetragen. Die Übereinstimmung mit den Werten aus der Nachlaufmessung ist sehr gut.

Um den zweiten Teil der theoretischen Rechnung, die Berechnung des Nachlaufes aus den Grenzsichtwerten an der Hinterkante, einer experimentellen Nachprüfung zu unterziehen, wurden die beiden Ausgangswerte δ_H^* und ϑ_H auch durch eine Messung der Geschwindigkeitsverteilung in der Plattengrenzschicht bestimmt, und es wurde mit diesen Werten nochmals die theoretische Rechnung durchgeführt. Auch hierbei zeigt sich eine überraschend gute Übereinstimmung mit den anderen Ergebnissen (Abb. 2 und 3).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Reibungseffekte durch eine plötzliche Erweiterung des Strömungsquerschnittes an der Plattenhinterkante hervorgerufen werden. Mit zunehmender Querschnittserweiterung, d. h. mit wachsender Plattendicke und abnehmendem Teilungsverhältnis, werden die Umlenkung und der Druckabfall infolge Reibung größer. Beides wird durch die Theorie gut wiedergegeben.

4. Das Zylindergitter

Beim Zylindergitter wurde nur eine Anordnung untersucht, und zwar wie beim Plattengitter (vgl. Abb. 1) diejenige mit dem Zuströmwinkel $\beta_1 = 45^\circ$. Das Teilungsverhältnis betrug $t/D = 4,2$, die mit der Anströmgeschwindigkeit $w_1 = 25 \text{ m/s}$ und dem Zylinderdurchmesser $D = 16 \text{ mm}$ gebildete Reynoldszahl betrug $Re = 2,5 \cdot 10^4$. Die Nachlaufmessung wurde genau wie beim Plattengitter durchgeführt und ergab einen Druckabfall von

$$\Delta p/q_1 = 0,4$$

und eine Umlenkung auf die Gitternormale hin von $\Delta\beta = -6,3^\circ$. Zum tieferen Verständnis der Vorgänge am Zylindergitter wurde auch die Druckverteilung am Zylinder gemessen, und zwar sowohl im Gitterverband als auch als Einzel-

zylinder. In Abb. 4 sind die beiden Druckverteilungen dargestellt. Beide Kurven zeigen den typischen Verlauf einer unterkritischen Zylinderströmung, die also starke Ablösungen schon vor Erreichen des Geschwindigkeitsmaximums und damit große Abweichungen von der Potentialströmung aufweist. Während aber beim Einzelzylinder die Ablösungspunkte noch symmetrisch zur Anströmung liegen, zeigt sich im Gitter eine Unsymmetrie derart, daß beide Ablösungspunkte etwa um 4° im Gegenuhrzeigersinn auf der Zylinderkontur

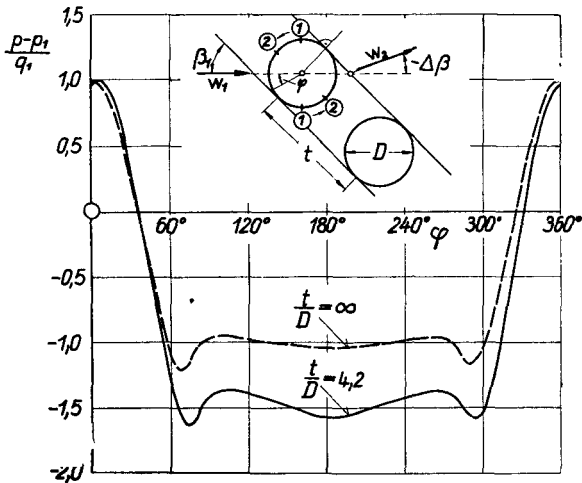


Abb. 4. Druckverteilung am Kreiszyylinder im Gitterverband. Reynoldszahl $Re = w_1 D / \nu = 2,5 \cdot 10^4$.
 Umlenkung: $\Delta\beta = -6,3^\circ$ (Nachlaufmessung);
 $\Delta\beta = -7,1^\circ$ (aus Druckverteilung);
 $\Delta\beta = -4,3^\circ$ (nach Taylor-Batchelor).

weitergewandert sind. Diese Unsymmetrie läßt sich aus einer potentialtheoretischen Betrachtung erklären. Beim Einzelzylinder ist die potentialtheoretische Druckverteilung symmetrisch zur Anströmrichtung. Die Geschwindigkeitsmaxima liegen an den in Abb. 4 mit (1) bezeichneten Stellen. Bei Annäherung der übrigen Zylinder des Gitterverbandes wird sich diese Druckverteilung ändern, und zwar werden sich bei sehr dicht stehenden Zylindern schließlich die Geschwindigkeitsmaxima bei den mit (2) bezeichneten Stellen befinden. Die Geschwindigkeitsmaxima und damit auch die Ablösungsstellen bei Berücksichtigung der Reibung liegen also symmetrisch zu einer Geraden, die mit abnehmender Teilung immer mehr in Richtung zur Gitternormalen umgelenkt wird. Dadurch wird auch die Strömung insgesamt beim Durchströmen des Zylindergitters zur Gitternormalen hin umgelenkt. Da andererseits mit kleiner werdendem Abstand zwischen den Zylindern die Ablösung bei größerem Unterdruck erfolgt, wird mit abnehmendem Teilungsverhältnis auch der Druckverlust im Gitter steigen. Die beiden Größen $\Delta\beta$ und $\Delta p/q_1$ lassen sich auch aus der gemessenen Druckverteilung bestimmen, und zwar zu $\Delta\beta = -7,1^\circ$ und $\Delta p/q_1 = 0,26$, dabei sind jedoch nicht die am Zylinder auftretenden Schubkräfte miterfaßt worden.

Ganz ähnliche Effekte, wie sie hier beim Zylindergitter beobachtet wurden, kennt man seit langem für netzartige Maschengitter, wie sie z. B. in Windkanälen zur Turbulenzerzeugung benutzt werden. Wird ein solches Maschengitter schräg in die Strömung gestellt, so tritt neben dem Druckabfall auch noch eine Ablenkung der Strömung zur Gitternormalen hin auf. Systematische Untersuchungen an Maschengittern sind vor allem von *G. I. Taylor* und *G. K. Batchelor* [7] durchgeführt worden. Dabei ergab sich, daß zwischen dem Druckabfall und der Umlenkung unabhängig von der Art des Gitters (Maschenweite) und der *Reynoldszahl* ein universeller Zusammenhang besteht, eine Tatsache, die in der Theorie der homogenen Turbulenz eine wichtige Rolle spielt. Nach dieser Gesetzmäßigkeit ergäbe sich für unser Zylindergitter mit einem Druckabfall von $\Delta p/q_1 = 0,4$ eine Umlenkung von $\Delta\beta = -4,3^\circ$. Die Zusammenhänge zwischen Zylindergittern und Maschengittern im einzelnen aufzufinden, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

5. Zusammenfassung

Zur Klärung des Reibungseinflusses auf Schaufelgitterströmungen sind zwei besonders einfache Gitteranordnungen experimentell untersucht worden: 1. ein Plattengitter mit 45° Staffelungswinkel und plattenparalleler Zuströmrichtung, 2. ein Kreiszylindergitter mit 45° Zuströmwinkel. Der Druckabfall im Gitter und der Umlenkungswinkel, die für verschiedene Teilungen gemessen wurden, sind hierbei reine Reibungseffekte. Beim Plattengitter erfolgt die Umlenkung zur Gitterfront hin, beim Zylindergitter jedoch in entgegengesetzter Richtung. Für das Plattengitter ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Messungen mit theoretischen Ergebnissen, die man aus einer Grenzschichtrechnung erhält [2]. Beim Zylindergitter wird die Umlenkung durch eine unsymmetrische Ablösung der Strömung verursacht, was durch die Theorie nicht erfaßt werden kann.

Literatur

- [1] *Schlichting, H.*, Berechnung der reibungslosen inkompressiblen Strömung für ein vorgegebenes ebenes Schaufelgitter. VDI-Forschungsheft 447 (1955).
- [2] *Schlichting, H. und Scholz, N.*, Über die theoretische Berechnung der Strömungsverluste eines ebenen Schaufelgitters. Ing.-Archiv 19, (1951), S. 42–65.
- [3] *Scholz, N.*, Über die Anwendung der Impulsmethode bei Messungen an Schaufelgittern. Z. angew. Math. u. Mech. 34 (1954), S. 339–341.
- [4] *Scholz, N.*, Über die Durchführung systematischer Messungen an ebenen Schaufelgittern. Habilitationsschrift an der T. H. Braunschweig (1955); erscheint demnächst in Z. f. Flugwiss.
- [5] *Pfleiderer, C.*, Die Kreiselpumpen. Springer-Verlag, Berlin (1949).
- [6] *Schlichting, H.*, Grenzschichttheorie. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1951). Engl. Übersetzung: Boundary Layer Theory, Mc Graw Hill, New York 1955 und Pergamon Press London 1955.
- [7] *Taylor, G. I. and Batchelor, G. K.*, The Effect of Wire Gauze on Small Disturbances in a Uniform Stream. Quart. Journ. Mech. a. Appl. Math., Vol. II (1949), pp. 1–29.

[Aus dem Institut für Strömungsmechanik der T. H. Braunschweig]